被服図形の合成則に関する研究

（第5報）有限要素法に基づく着衣基体の構造模型

和　知　孝　雄

Principles of Garment Figure Synthesizing PART V
A Structural Model of the Dress Form using the Finite Element Method

TAKAO WACHI

序　　論

前報[1)2)3)4)]までは，主として被服図形のうちでも平面的な被服図形の合成則について報告した。

そこでは，被服図形の幾何学的な構造の記述に対して代数的な構造を対応させて合成則を記述した。このことによって得られる被服設計学上の主な利点は，第1に，被服図形の煩雑な幾何学的な記述や，操作，それに合成が，簡潔な代数的演算で与えることができたことである。これによって，コンピュータによる被服図形の合成が著しく容易になった。第2に，被服図形の幾何学的記述に基底接続代数系を用いることによって，多種多様な方法によって製図されている被服型紙に対して，統一的な形状モデルを与えることができることである。

そして，第3番目の利点は，被服図形を，それを構成している部分図形に分割して，それぞれを，相互に独立した部分接続代数系で記述し，その後，必要に応じて，ひとつの代数系に統合することによって，所要の被服図形を合成できることである。これらは，被服図形の分割記述とそれらの統合則を統一的に与えている。

本報では，以上の研究結果を基盤として，平面的な被服図形と，立体的な着衣基体との合成則を明らかにする目的で，着衣基体の有限要素法モデルの構成について述べる。

ところで，被服の構成は，基本的には，平面的な布を立体的な被服に構築することであるが，出来上った衣服を，建築構造や，航空機体構造，それに船舶構造などのような3次元構造物として，構造工学的に扱った研究報告は見当らない。たとえば，一着の被服を構成するには，何枚かの型紙を用いて，2次元の布から，被服の構成要素（要布）を切り出し，これを着衣基体の曲面に適合するように3次元的に縫合する。このとき，3次元構造物と考えられるのは着衣基体として，現在最も多く用いられている人台（ダミー）である。あるときには，着衣者自身の生体が，着衣基体として選ばれる。これらの人台も生体も，構造模型という視点からは，物理的な実物模型であり，被服構成を構造工学的に扱うには，これらの物理的模型のかわりに数式的模型を構築することが，被服設計学における種々の数値実験を行うためには必要である。さらに，もし，着衣基体を3次元的な被服図形と考えるのなら，被服構成における要布の立体構成は，2次元的な被服図形（要布）と，3次元的な被服図形（着衣基体模型）との間でおこなわれる図形の合成演算と考えることができ，被服の平面図形に関して得た図形の合成規則を，3次元被服図形へも適用できるように拡張することも可能となる。

このような観点から，本研究では，被服構成における構造工学的側面に着目し，現在，構造工学において，構造模型として最も有力な有限要素モデルを用いて，着衣基体の構造モデルの構築を試み，このモデルを用いて，人台と生体（セッコウ像）の有限要素モデルをマイクロコンピュータ上で数値実験した。

着衣基体の有限要素モデル

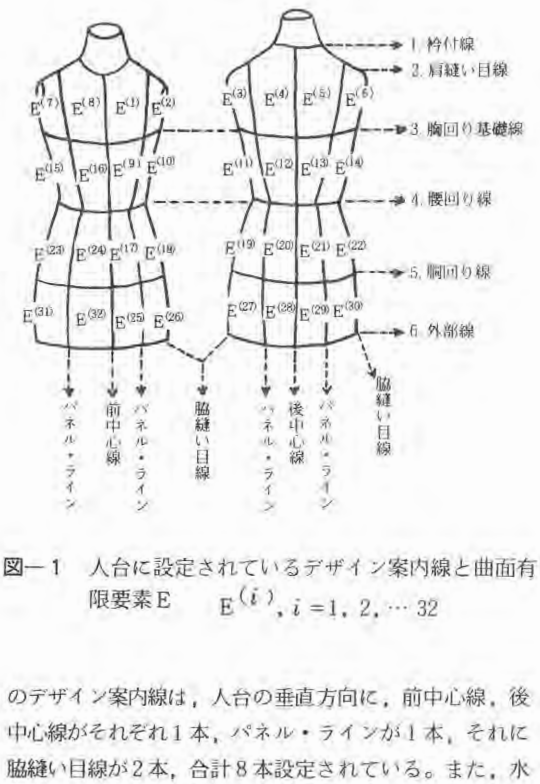
人体の構造模型の表現に，有限要素法を適用したのは，P. Silvester[5)]が最初である。彼は，医用生体工学のベクトル心電図学の分野において，不均斉な人体の胴部に対して有限要素を適用した。医用生体工学においては，生体内部の構造を有限要素で表現することが主流であり，被服構成に見られるような，生体外部の着衣や着衣基体などの曲面の創成に有限要素を適用した研究は見当らなかった。

そこで，本研究では，被服設計学上，特に興味のある被服基体の曲面創成に注目して，有限要素法の適用を行うこととした。

1．着衣基体曲面領域の要素分割

生体の曲面形状は，個体差もあり，また単純な数式だけで表現することは，困難である。しかしながら，被服構成においておこなわれている3次元的な布の構築は，この生体の曲面形状そのままに，布を立体構成する場合は，希れで，ほとんどの場合は，被服デザイナーによって，この生体の曲面形状を基礎として，所要の着衣が構成する曲面へ再構成される。これがいわゆる着衣基体の曲面である。

ところで，着衣基体として多用されている人台には，その曲面上に，細いテープを貼りつけて，デザイン案内線として用いているものが多い。それらの典型的な例は，図1に示すような人台である。図に示すように，それら



図―1　人台に設定されているデザイン案内線と曲面有限要素E　$E^{(i)}, i=1, 2, \cdots 32$

のデザイン案内線は，人台の垂直方向に，前中心線，後中心線がそれぞれ1本，パネル・ラインが1本，それに脇縫い目線が2本，合計8本設定されている。また，水平方向には，衿付け線，肩山縫い目線，袖付線，胸回り基礎線，腰回り線，および胴回り線と，それに人台の最下部の外部線と，合計8本の線が設定されている。これらのデザイン案内線は，また，立体裁断によって被服を構成するときにも，人台の曲面構造を反映した基本構造線として常用されなくてはならないものである。

さて，これらの人台上のデザイン案内線を，有限要素的な視座から見ると，人台の曲面領域を，図―1に示すように32個の部分曲面有限要素に分割していることが分かる。この分割方式は，多くの被服構成法で常用されている伝統的な方法であり，工業用の人台も，この分割方式を採用しているものが多いことから，着衣基体の有限要素への分割も，これを起点にするのが自然であろう。

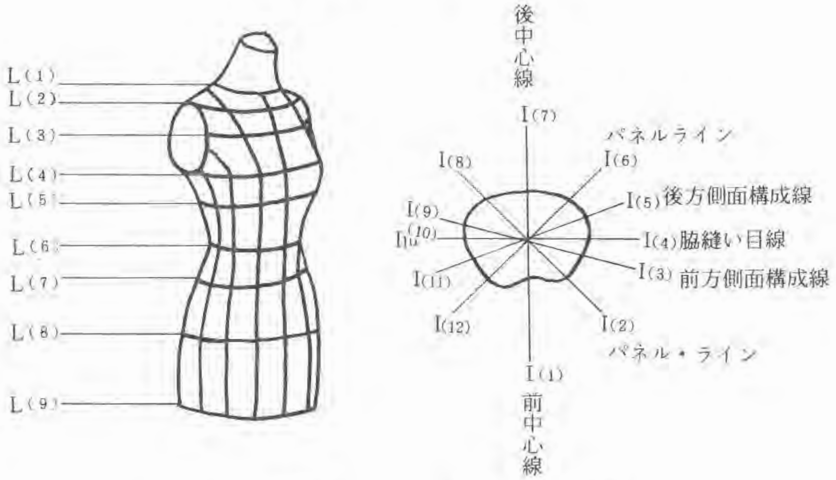
そこで図1において，人台を水平方向の切断している位置を，それぞれ緯度レベル $L_{(l)}$ ($l=1, 2, \cdots, 6$) と呼ぶこととし，垂直方向に切断している位置を前正中線を起点に選んで経度レベル $1_{(i)}$, ($i=1, 2, \cdots, 8$) とすれば，人台は32個の3次元曲面要素 $E_{(l)}$ ($l=1, 2, \cdots, 32$) で構成されていることがわかる。

ところで，有限要素法を特定の構造物に適応する場合において，最も重要な課題は，その構造物に適した特定の有限要素を選択することと，領域を分割したそれぞれの要素内の状態を良く近似する形状関数（Shape function）を決定することである。人台曲面上に15本のデザイン案内線を描くことだけで得られる32個の有限要素は，要素の境界線が空間曲線である四辺形要素であるから，平面な布と，着衣基体との関係を求明しようとする本研究の目的には，境界線が直線であるような簡単な有限要素の方が望ましい。そこで，いま，32個の有限要素の全ての境界線を直線に置換えると，境界線のあるものは，人台の内部を貫通し，着衣基体の構造模型としては不都合である。また，不用意に，緯度レベルや経度レベルを増してしまうと，いたずらに要素数を増すことになり，着衣基体の構造模型が複雑になる恐れがある。そこで，立体裁断でおこなわれている手続を参考にして，図2に示すように新たに緯度レベルと経度レベルをそれぞれ4箇所つけ加えた。それらは，肩峰点を通る水平断面 $L_{(2)}$ と，これから垂直方向5cm下方の緯度レベル $L_{(3)}$，胸回り基礎線の垂直下5cmの水平断面を表わす緯度レベル $L_{(5)}$，および，腰回り線の垂直下5cmの緯度レベル $L_{(7)}$ である。

したがって，人台の曲面領域は，96個の4節点四辺形要素に分割し，全要素は117箇の節点（node）で構成できるものとした。しかしながら，生体や人台の曲面には，捩り面が多数存在していることが知られており，これらの曲面の変化には，四辺形要素では十分精度良く構造体を表現できないので，上記96個の4節点四辺形要素を，さらに2つの3角形要素に分割し，192個の3節点3角形要素で着衣基体の曲面領域を分割し，構造模型を構成することにした。

2．着衣基体有限要素の内挿関数の選択

複雑な幾何学形状を持つ着衣基体の曲面領域を117個の節点と192個の3角形要素に分割したが，これらの3角形要素の形状の記述には，3角形要素がある種の適合条件を満足するように与えなくては，着衣基体の元の形



緯度レベルの設定　　経度レベルの設定

図2　着衣基体構造模型を構策するために設定した緯度レベルと経度レベル

状を反映できないことが知られている。[6] もし，要素に対する適当な内挿関数を選択すれば，特定の節点に対する要素の内部状態を完全に記述することができる。いいかえれば，着衣基体は，3次元空間内における点の無限の集まりであるが，有限要素法モデルを用いれば，有限個の節点の値と，三角要素の内挿関数を決めれば，それらの値を全て作り出すことができたということである。このことは被服設計学にとって極めて有益な着衣基体の表現形式を与えることになる。たとえば，着衣基体は，被服のデザイナーによって，修正を加えられるが，この修正を，前記の192節点における値だけを修正することに限定したとすれば，修正後の着衣基体は，内挿関数を用いれて，完全に再構成できるということになる。

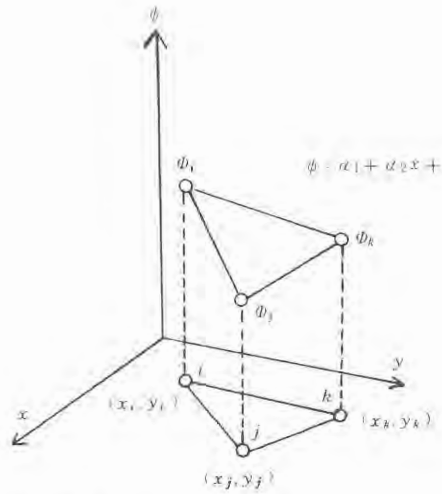
そこで，ここでは有限要素法で最初に使用され，現在でも最も多く使用されている3節点の平板三角形要素に対する，2次元シンプレックス要素を適用することとする。

2次元シンプレックス要素は，図3に示すような3角形である。この要素は直線境界および各頂点に1つずつ3つの節点を持っている。このとき，図中の節点番号は，反時計回りに，i,j,k,と付けるものとする。

いま，3角形要素内における着衣基体のx－y座標面からの高さをφとすると，このときの内挿関数は，次式で与えられる。

$$\phi = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y \cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

i,j,k,の各節点における座標値を，それぞれ(x_i, y_i)，(x_j, y_j)，(x_k, y_k)とし，各節点における高さをそれぞれ



図—3　2次元シンプレックス三角形要素

Φ_i, Φ_j, Φ_k,とすると，節点条件は，

$$\begin{aligned} x=X_i,\ y=Y_i \quad &で \quad \phi=\Phi_i, \\ x=X_j,\ y=Y_j \quad &で \quad \phi=\Phi_j \quad \cdots\cdots\cdots (2) \\ x=X_k,\ y=Y_k \quad &で \quad \phi=\Phi_k \end{aligned}$$

である。

これを，式(1)に代入すると，次式を得る。

$$\begin{aligned} \Phi_i &= \alpha_1 + \alpha_2 X_i + \alpha_3 Y_i \\ \Phi_j &= \alpha_1 + \alpha_2 X_j + \alpha_3 Y_j \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (3) \\ \Phi_k &= \alpha_1 + \alpha_3 X_k + \alpha_3 Y_k \end{aligned}$$

これより，

$$\alpha_1=\frac{1}{2A}[(X_j Y_k - X_k Y_j)\Phi_i + (X_k Y_i - X_i Y_k)\Phi_j + (X_i X_j - Y_j X_i)\Phi_k]$$
$$\alpha_2=\frac{1}{2A}[(Y_j - Y_k)\Phi_i + (Y_k - Y_i)\Phi_j + (Y_i - Y_j)\Phi_k] \quad \cdots\cdots(4)$$
$$\alpha_3=\frac{1}{2A}[(X_k - X_j)\Phi_i + (X_i - X_k)\Phi_j + (X_j - X_i)\Phi_k]$$

このとき

$$A=\frac{1}{2}\begin{vmatrix} 1 & X_i & Y_i \\ 1 & X_j & Y_j \\ 1 & X_k & Y_k \end{vmatrix}.$$

したがって，三角要素を規定する要素関数は，式(3)に示すように，三角形の各節点に１つずつ割付けられた３つの内挿関数が１組となって構成されている。

また，式(3)は，いくつかの三角形要素を繋いで，着衣基体の曲面形状を近似するとき，ϕの微分値が一定となることから，各要素はC^0級の連続性を与えることが分かる。したがって着衣基体上の高さϕは、どの２節点間も直線的に変化し，ϕは３角形の３辺の境界上で線型に変化するので，デザイナーが着衣基体変化を修正するときに，着衣基体の構造模型と，デザイナーの高さに対する感覚が一致しやすくなるという利点がある。

３．着衣基体模型における体型表示の一方法

着衣基体模型における体型表示の方法を検討しておくことは，被服の工業的生産の立場から，重要である。実は，三角形有限要素法モデルに基づく着衣基体模型を用いれば，生体の体型や，人台の体型を３次元的に表現できるだけでなく，着衣の曲面構造特性も統一的に表示できるという利点がある。しかしながら，この方法による体型表示は，３次元空間におけるベクトル量となるため，従来の体型表示方法とは、かなり様子が異なったものになる。

したがって，現状では，ここで提案する体型表示法が現実に従来の体型表示法の代替案となるとは，直ちに主張するものではない。

さて，三角形有限要素モデルに基づく着衣基体模型では，体型を表示するのに利用できる形状情報は，いろいろと考えられる。その中でも，特に直観的に分かりやすい２つの方法を次に示す。

１）有限要素の面ベクトルで体型を表示する方法。

この方法は，着衣基体を構成する三角形要素の面がどちらの方向に向いているかで、体型を表示する方法である。実際には，192個の要素の内で，着衣基体の対称性から，96個の要素の面ベクトルを求めれば十分である。また、被服構成上重要であると考えられる要素は，多くの場合，さらに96個より少ないと考えられるので，上衣に対しては，３，４個の要素を指定し，下衣については２，３個の要素を指定すれば，体型を表示できると考える。

２）節点における法線ベクトルで体型を表示する方法

この方法は，１つの節点の回りには，６個の三角形要素が集っていることに注目して，各節点における法線ベクトルを，これら６つの要素面の法線ベクトルの積として，定義することにより求める方法である。この方法では，体型の補正が，節点の座標値の修正だけで済むので，被服デザイナーが利用しやすい体型情報を与えることができると考えられる。

実　験　方　法

有限要素法モデルに基づく着衣基体模型の構築に関する前述の議論を検証するために，マイクロコンピュータを用いて数値実験をおこなった。

実験に使用した着衣基体の物理模型は，婦人服用９号人台と，生体上半身分のレプリカ石膏像である。

実験方法の概略をつぎに示す。

１）人台の横断面形状を，緯度レベル$L(i)$, $i=1,2,3,\cdots,9$で採取し，石膏像については緯度レベル$L(i)$, $i=2,3,4,5,6$で採取した。なお，各横断面状の座標値の読取りは極座標系で，偏角５度のピッチでおこなった。

２）着衣基体の全体座標系は，体軸にZ軸を一致させた右手円柱座標系（r，θ，z）を用いた。

３）これらの読取った座標値から，各三角形要素の節点に相当する座標値を選びだして，構造模型に入力した。人台に相当する着衣基体構造模型では，117点の（r，θ，z）座標値を，また石膏像に対するものでは，65点を入力した。

４）式(2)，(3)，(4)を用いて，各三角要素ごとに，要素関数をコンピューター内に作った。

５）この要素関数を用いて，各要素面の面ベクトルと，各節点での法線ベクトルを算出する。

６）次に，コンピュータ内で構築された着衣基体の構造模型を，コンピュータの画像表示装置に取り出すために，透視変換を施し，構造模型の透視図形を作成する。

7）しかしながら，3次元形状の構造模型を，そのまま，画面に表示すると，実際には隠れて見えないはずの線や面を区別せずに現われるので，構造模型としての形状が一意には定まらなく，模型の形状の把握が困難となる。そこで，実際には，隠れて見えない線や面を捜し出し，画面の表示から消去する隠れ面（線）消去処理をおこなった。

実験結果および考察

実験結果は図4と図5に示した。図4は人台に対する着衣基体の有限要素構造模型の実験結果を示しており，図5は生体の石膏像に対する模型の実験結果を示している。図4－1，4－2，4－3，と図5－1，5－2，5－3は，実験に使用した数値データをそのままの形で

図4－1　実験に用いた人台の正面図

図4－2　実験に使用した人台の側面図

図4－3　実験に使用した人台の背面図

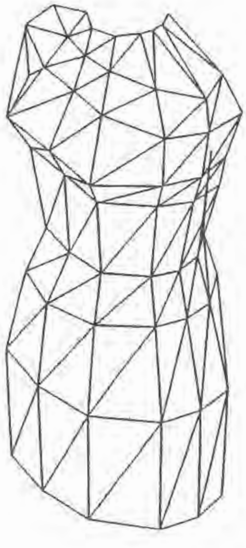


図4－4　三角形有限要素モデルに基づく人台の着衣基体構造模型の斜め前方から見た正面図

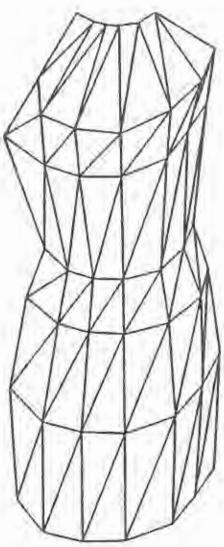


図4—5　三角形有限要素モデルに基づく人台の着衣基体構造模型の側面図

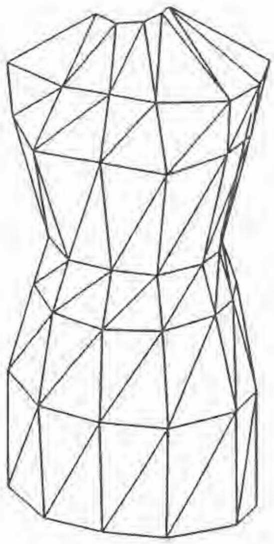


図4—6　三角形有限要素モデルに基づく人台の着衣基体構造模型の背面図

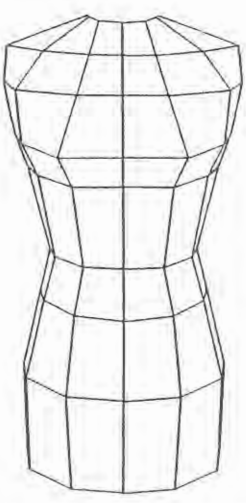


図4—7　人台の着衣基体構造模型の完成図（正面図）

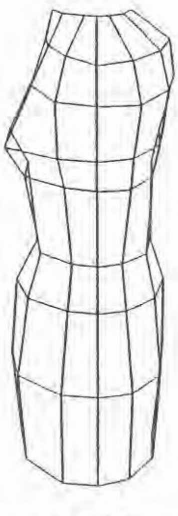


図4—8　人台の着衣基体構造模型の完成図（左側面図）

図形表示したものである。これらのデータを基に，192個の3節点2次元シンプレックス三角形有限要素からなる着衣基体の構造模型を構築した結果を，図4—4，4—5 4—6と図5—4，5—5に隠れ面処理を施して表示している。

図4—7，4—8，4—9と図5—6，5—7，5—8は，これらの構造模型をさらに見やすい形に表示し直したものである。

これらの実験結果から明らかなように，有限要素法を人台や，生体の石膏像に適用することによって，被服の3次元的な構成面が簡潔に整理された形で再構成されている。また人台と生体とを元にした着衣基体では，構造模型の構築法が同一であるにもかかわらず，それぞれの着衣基体の構成面の3次元的な構造の違いが，構造模型の上で簡潔な形でよく把握できていることが分かる。

要　　約

1）複雑な幾何学的形状を持つ着衣基体を，有限要素法を用いて192個の3節点3角形有限要素で分割する着衣基体の構造模型を示した。

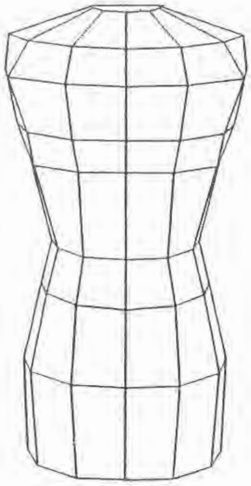


図4－9　人台の着衣基体構造模型の完成図（背面図）

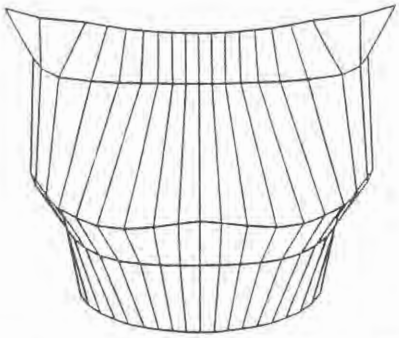


図5－1　実験に用いた生体石膏像の正面図

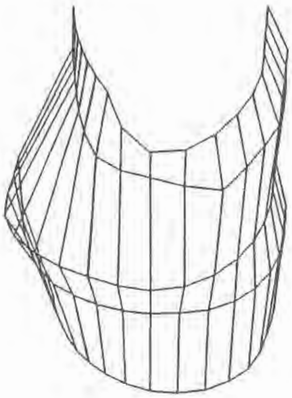


図5－2　実験に用いた生体石膏像の側面図

図5－3　実験に使用した生体石膏像の背面図

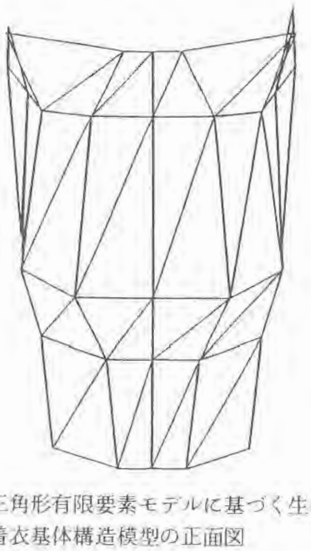


図5－4　三角形有限要素モデルに基づく生体石膏像の着衣基体構造模型の正面図

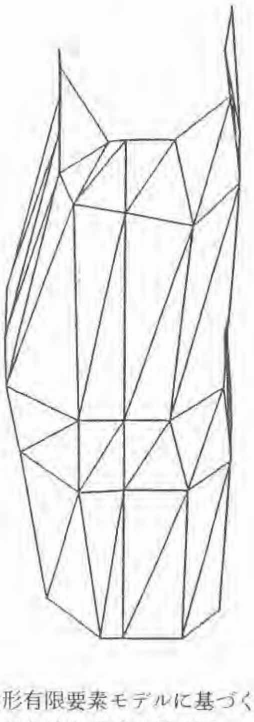


図5－5　三角形有限要素モデルに基づく生体石膏像の着衣基体構造模型の側面図

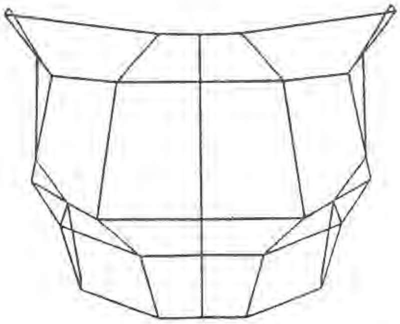


図５－６　生体石膏像の着衣型体模型の完成図(正面図)

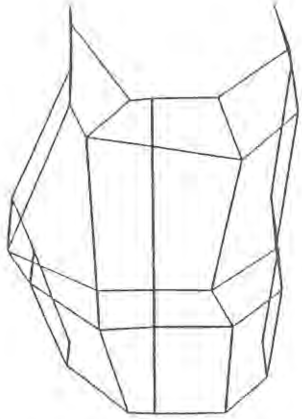


図５－７　生体石膏像の着衣基体構造模型の完成図（左側面図）

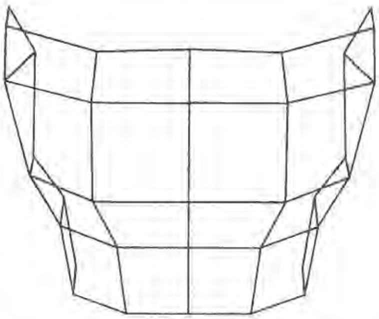


図５－８　生体石膏像の着衣基体構造模型の完成図（背面図）

２）三角形要素を規定する要素関数は，２次元シンプレックス三角形要素を用いて，各節点に１つずつ割り当てた３つの内挿関数を用いて，要素内の高さを与えたので，これを用いて着衣基体の全表面の座標値を求めることができた。

３）これらをもとにして，着衣基体の構造模型を，有限要素法をもとにして構築した。

４）この着衣基体模型を検証するために，人台と生体のレプリカ石膏像を元にした着衣基体構造模型を作成した。

５）これらの模型について，コンピュータを用いて，数値実験した。

６）また，コンピュータで作りだした構造模型を，その形状把握が容易となるように，透視変換と隠れ面（線）処理面画を得た。

７）実験結果から，いずれも，着衣基体の３次元的な幾何学的構造を，簡潔に表現した構造模型を与えていることが分った。

文　　献

１）和知孝雄：本紀要，27，107（1979）
２）和知孝雄：idid.，28，119（1980）
３）和知孝雄：idid.，30，123（1982）
４）和知孝雄：idid.，30，131（1982）
５）Silvester. P. and S.Tynchyshyn, Adovance in Cardiology, 10., 46−50 (1972)
６）Zienkiewicz, o.c., The Finite Element Method in Engineering Science, McGrow-Hill (1971) London

（昭和58年11月８日受理）

Summary

This paper describes the computer aided dress form building method using the finite element method. It also provides a design tool for apparel draping.

Draping is a method of patternmaking for fashion design that allows free and accurate expression of ideas as the designer works. It is a three-dimensional process of designing. The fashion designer gives three-dimensional form to an idea for a garment using draping. This work of the designer is usually done on a dress form or person.

The emphasis of this paper is on replacing a curved body form surface by a collection of finite elements, so that it would seem to be just as realistic to make a desirable feature in draping. By pondering the analogy between a draping and the building of a model, we are led to our conception of draping and patternmaking as forms of engineering structures. The dress form building method presented here is partially based on the finite element method, which is now used as an everyday engineering tool in many structural form design offices.

The derivation of detailed governing equations for body form or a dress form presents many difficulties and, in fact, leads to many alternative formulations, each depending on the approximations introduced.

In the finite element treatment of the dress form building problems to be described in this paper, the difficulties referred to above are eliminated at the expense of introducing a further approximation. This approximation is of a traditional, rather than mathematical, nature. However, for many practical purposes this approximation gives very adequate dress forms.

In this model it is assumed that the behaviour of a continuously curved surface can be adequately represented by the behavior of a surface built up of small, flat, elements. In the division of an arbitrary body form into flat elements only triangular elements can be used. The functions performed in the model include:

1) The dress form is divided into a number of triangular finite elements.

2) The elements are assumed to be interconnected at a discrete number of nodal points situated on their boundaries.

3) A set of functions is chosen to definite uniquely the state of deformation within each finite element in terms of its nordal deformation.

By using this model in the definition of the form of the dress, some significant improvements to current draping techniques are possible. The most important aspect of them is that by providing a way to vary detail the model can yield an incremental improvement to existing draping system for producing garments without modifying their physical model.

Several examples of the dress form are achieved by the use of this model. The results given in this indicate the convergence of both the physical surface of the form, and of the mathematical surface involved in the finite element formulation, is excellent.